

УДК 519.87:626/627

С. М. Васильев

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ПРИ РАСЧЕТЕ ГИБКИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Целью исследований является математическое моделирование работы элемента гидравлического регулятора гидромелиоративной системы с гибким рабочим органом, выполненное с использованием программного комплекса SolidWorks в модуле Simulation для реализации необходимых и достаточных гидравлических исследований и получения всех требуемых для проектирования данных. Исследования основаны на численном решении нестационарных уравнений Навье – Стокса, выделены в вычислительную гидродинамику (англ. CFD – computational fluid dynamic). Решение поставленной задачи осуществлено исследованием зависимостей прогибов армированной ленты от оказываемого на нее гидравлического давления. В результате проведенных исследований выполнены расчеты напряжений по трем опытам численного моделирования с целью обоснования возможности применения нестационарных уравнений Навье – Стокса при определении параметров регуляторов гидравлического действия в системе автоматического проектирования. В программном комплексе SolidWorks была создана 3D модель, и построены эпюры. По данным эпюрам можно определить напряжение практически в любой точке гибкого рабочего элемента, а также констатировать то, что наибольшие напряжения возникают в местах локального армирования по всей длине и площади. В зависимости от вида материала, участвующего в расчете, каждому из них задавались соответствующие свойства. По результатам исследований выявлено, что красные участки расположены в местах максимального перемещения, в которых вода наиболее сильно прогибает ленту под действием гидравлического давления. В местах армирования перемещения минимальны, что говорит о его работоспособности и целесообразности. Наряду с отмеченным полученные результаты позволяют выявить связь напряжений в гибком рабочем органе и перемещений от нагрузки.

Ключевые слова: гидромелиоративная система, гидравлический регулятор расхода, надежность, моделирование, гибкий рабочий орган.

S. M. Vasilyev

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

SUBSTANTIATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS COMPLEX FOR CALCULATING FLEXIBLE WORKING ELEMENTS OF HYDRAULIC REGULATORS

The aim of research is mathematical simulation of work of irrigation systems hydraulic regulator elements with flexible working elements performed with SolidWorks software package in the Simulation module for necessary and sufficient hydraulic studies implementation and obtaining all required data for the design. Research is based on the numerical solution of unsteady Navier – Stokes equations, selected into computational fluid dynamics (CFD – Computational fluid dynamic). The solution of the given task is carried out by inves-

tigation of dependences of armored band deflection on hydraulic pressure exerted on it. Based on the results of research conducted stress analyses in three experiments of numerical modeling aimed to justify the possibility of using non-stationary Navier – Stokes equations in determining the parameters of hydraulic regulators in the system of automatic design were done. The 3D model was created by software package SolidWorks, and curves were constructed. According to them the tension practically in any point of flexible operating element can be determined. One can state that the greatest tension occurs in spots of local reinforcement throughout the length and area. Depending on the type of material involved in the calculation, each of them was given related features. According to studies it was revealed that the red areas are located in places of maximum displacement, where water bends the band under the action of hydraulic pressure the most. In places of reinforcement the displacements are minimal, which indicates its efficiency and viability. Also the received results reveal the connection of tension in flexible working elements and their displacement on the load.

Keywords: irrigation system, hydraulic water flow regulator, reliability, simulation, flexible working element.

Введение. Одним из основных требований к гидравлическим регуляторам расхода или уровня воды, работающим в сложных условиях гидромелиоративных систем, является надежность. В настоящее время все больше исследователей, занимающихся данным направлением, склоняются к необходимости использовать в регуляторах гидравлического действия именно гибкие рабочие органы [1–4]. Эта тенденция обоснована тем, что развивающаяся резинотехническая отрасль производства предлагает все более разнообразные материалы, которые могут применяться в качестве гибких рабочих органов гидравлических регуляторов, при этом они имеют невысокую стоимость и долговечны в эксплуатации.

Структура гибких рабочих материалов практически одинакова, это – тяговый каркас, состоящий из одной или нескольких тяговых прокладок, соединенных холодной или горячей вулканизацией. С двух сторон (снаружи) материала устраивают защитные слои из резины. Тканевый каркас может быть выполнен из следующих нитей: поливинилхлоридных, полиамидных, полиамидно-полиэфирных, комбинированных, в том числе и с хлопчатобумажной основой и других. Столь большое многообразие гибких рабочих материалов, устойчивых к истиранию, надежных в работе, способных выдерживать значительные нагрузки, подвигли исследователей к поиску их применения в регуляторах гидравлического действия. Однако

известна сложность расчета гидравлических регуляторов вообще [5, 6], а с гибкими рабочими органами тем более.

Целью исследований является математическое моделирование работы элемента гидравлического регулятора гидромелиоративной системы с гибким рабочим органом, выполненное с использованием программного комплекса SolidWorks в модуле Simulation для реализации необходимых и достаточных гидравлических исследований и получения всех требуемых для проектирования данных.

Материалы и методы. В статье рассмотрены основные положения комплексов вычислительной гидродинамики с целью обоснования возможности их применения при расчетах регуляторов гидравлического действия в системе автоматического проектирования (САПР). В качестве примера осуществлены расчеты некоторых конструктивно-технологических элементов гидравлических регуляторов с гибким рабочим органом.

Для гидродинамических расчетов используют методы компьютерного математического (численного) моделирования [7–11]. Наряду с расчетом интегральных характеристик технологии компьютерного моделирования позволяют получить локальные значения любых гидродинамических параметров в двумерном или трехмерном поле течения. При этом гидродинамические параметры в виде графиков, изополей и т. п. могут быть получены вблизи объекта и на его поверхности, в любой точке системы или наборе точек в ней. Методы компьютерного моделирования основаны на численном решении нестационарных уравнений Навье – Стокса, выделены в вычислительную гидродинамику (англ. CFD – computational fluid dynamic). CFD-методы в практике гидравлических расчетов только начинают применяться более широко, однако уже сейчас видно, что их использование позволит значительно ускорить процесс проектирования и существенно снизить финансовые и материальные затраты на новые проекты, в том числе и гидравлических регуляторов с гибкими рабочими органами.

Результаты и обсуждение. Для выбора программного комплекса CFD необходимо понимать, что основным уравнением гидродинамики является уравнение Навье – Стокса, которое в векторном виде записывается так:

$$\frac{\partial \vec{\mathfrak{V}}}{\partial t} = -(\vec{\mathfrak{V}} \cdot \nabla) \cdot \vec{\mathfrak{V}} + \nu \cdot \Delta \cdot \vec{\mathfrak{V}} - \frac{1}{\rho} \cdot \nabla \cdot p + \vec{f}, \quad (1)$$

$$\vec{\mathfrak{V}} \cdot \nabla = 0, \quad (2)$$

где $\vec{\mathfrak{V}} = (\mathfrak{V}^1, \dots, \mathfrak{V}^n)$ – векторное поле скоростей;

t – время, с;

∇ – оператор набла;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

Δ – векторный оператор Лапласа;

ρ – плотность, кг/м³;

p – давление, Па;

\vec{f} – векторное поле массовых сил.

Неизвестные p и $\vec{\mathfrak{V}}$ являются функциями времени t и координаты $x \in \Omega$, где $\Omega \subset R^n$, $n = 2, 3$ – плоская или трехмерная область, в которой движется жидкость. Это уравнение является основным для решения задач в системе CFD.

Рассмотрим в системе CFD возможность решения задачи увязки жесткости гибкого рабочего органа и его армирования как с целью повышения надежности перекрытия отверстия, так и для уменьшения жесткости элемента, коррелируемой с чувствительностью регулировочного клапана.

Для решения поставленной задачи проведено исследование зависимости прогибов армированной ленты от оказываемого на нее гидравлического давления. В программном комплексе SolidWorks была создана 3D модель, реалистичное изображение которой представлено на рисунке 1.

Части регулятора с гибким рабочим органом представлены на рисунке 2. Далее было осуществлено математическое моделирование элемента

регулятора в модуле Simulation программного комплекса SolidWorks, и реализован его расчет. Предварительно деталям регулятора были заданы материалы с соответствующими свойствами.

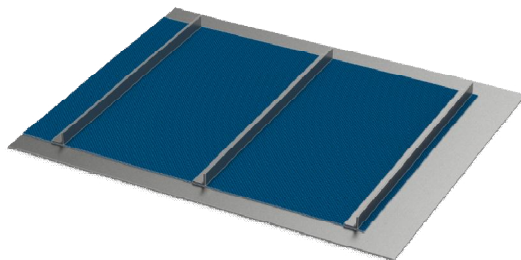


Рисунок 1 – Модель в 3D реалистичного изображения элемента гидравлического регулятора с гибким органом

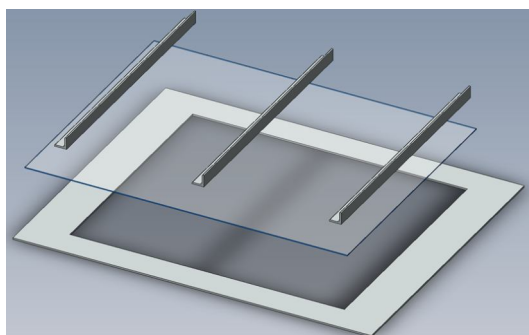


Рисунок 2 – Трехмерная модель регулятора с представлением поэлементно

Необходимые геометрические размеры для математической модели представлены на рисунке 3.

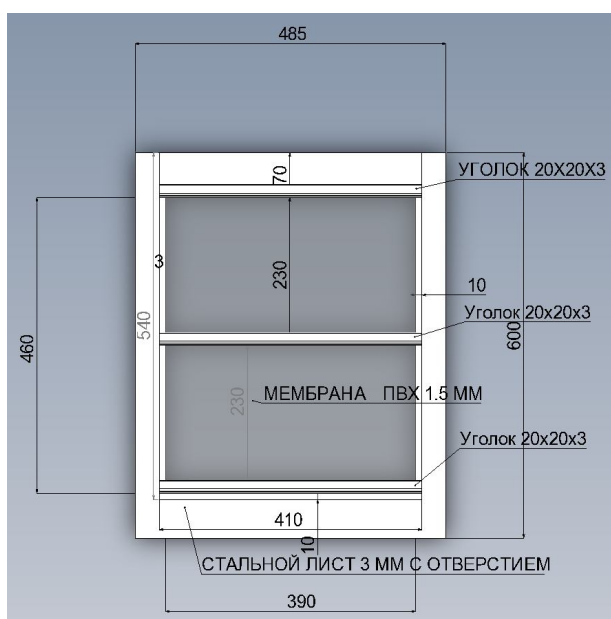


Рисунок 3 – Геометрические размеры расчетного элемента регулятора

В таблице 1 представлены элементы регулятора и их расчетные свойства. Исходя из вида материала, участвующего в расчете, каждому из них необходимо задать следующие свойства. Для металлических элементов – тип модели, критерий прочности, предел текучести, предел прочности при растяжении, модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность, модуль сдвига. Для материала гибкого рабочего органа – тип модели, предел прочности при растяжении, модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность и модуль сдвига.

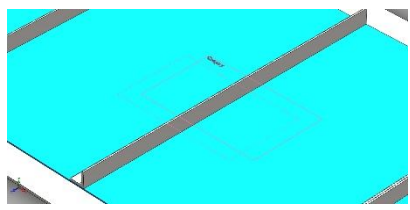
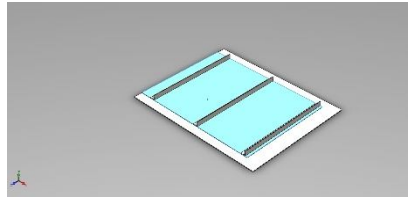
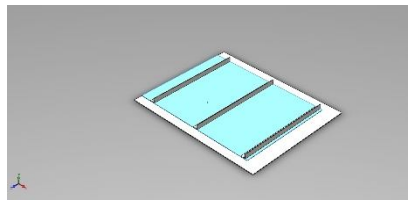
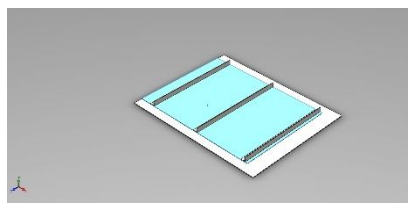
Таблица 1 – Элементы регулятора и их свойства

Компонент	Свойство материала	
	Параметр	Значение
1 Стальной лист 3 мм с отверстием (ГОСТ 19903-74) 2 Уголок 20 × 20 × 3 (ГОСТ 8509-93)	Материал	Литая углеродистая сталь
	Тип модели	Линейный, упругий, изотропный
	Критерий прочности по умолчанию	Максимальное напряжение von Mises
	Предел текучести	$2,48168e + 0,08 \text{ Н/м}^2$
	Предел прочности при растяжении	$4,82549e + 0,08 \text{ Н/м}^2$
	Модуль упругости	$2e + 0,11 \text{ Н/м}^2$
	Коэффициент Пуассона	0,32
	Массовая плотность	7800 кг/м^3
	Модуль сдвига	$7,6e + 0,10 \text{ Н/м}^2$
	3 Мембрана ПВХ 1,5 мм	Материал
Тип модели		Смягченный, линейный, упругий, изотропный
Предел прочности при растяжении		$3,24e + 0,08 \text{ Н/м}^2$
Модуль упругости		$2,41e + 0,09 \text{ Н/м}^2$
Коэффициент Пуассона		0,47
Массовая плотность		1226 кг/м^3
Модуль сдвига		$8,667e + 0,08 \text{ Н/м}^2$

Скомпонованные данные для расчета представлены в таблице 2. Числа в конце наименований нагрузок обозначают номер расчета от первого и до третьего. В расчете учитывался собственный вес и гидростатическое давление на гибкий рабочий орган, направленное перпендикулярно поверхности.

Результаты дискретизации трехмерной реальной модели посредством сетки из конечных элементов показаны на рисунке 4.

Таблица 2 – Скомпонованные расчетные данные

Имя нагрузки	Изображение	Данные	
Сила тяжести		Справочный	Сверху
		Значения	0,00–9,81
		Единицы измерения	SI
Давление – 1		Объекты	Одна грань
		Тип	Перпендикулярно выбранной грани
		Значение	3922,55
		Единицы измерения	Н/м ²
		Угол фазы	0
		Единицы измерения	deg
Давление – 2		Объекты	Одна грань
		Тип	Перпендикулярно выбранной грани
		Значение	4903,19
		Единицы измерения	Н/м ²
		Угол фазы	0
		Единицы измерения	deg
Давление – 3		Объекты	Одна грань
		Тип	Перпендикулярно выбранной грани
		Значение	5883,828
		Единицы измерения	Н/м ²
		Угол фазы	0
		Единицы измерения	deg

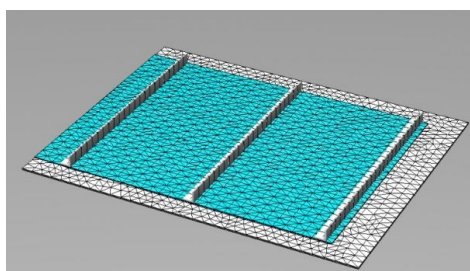


Рисунок 4 – Сетка комбинированного типа конечных элементов на трехмерной модели

Осуществленные расчеты в модуле Simulation программного комплекса SolidWorks сведены в таблицы. В таблице 3 представлены расчеты напряжений по трем опытам численного моделирования из таблицы 2.

На рисунках 5–7, внесенных в таблицу 3, демонстрируются визуализированные эпюры напряжений для трех расчетов. По данным эпюрам

можно определить напряжение практически в любой точке гибкого рабочего элемента, а также констатировать то, что наибольшие напряжения возникают в местах локального армирования по всей длине и площади.

Таблица 3 – Расчеты напряжений по трем опытам численного моделирования

Имя	Тип	Минимум	Максимум
Напряжение – 1	VON: Напряжение von Mises в Шаге № 13 (1 секунды)	0 Н/м ² Узел: 19954	2,94397e + 0,07 Н/м ² Узел: 4401

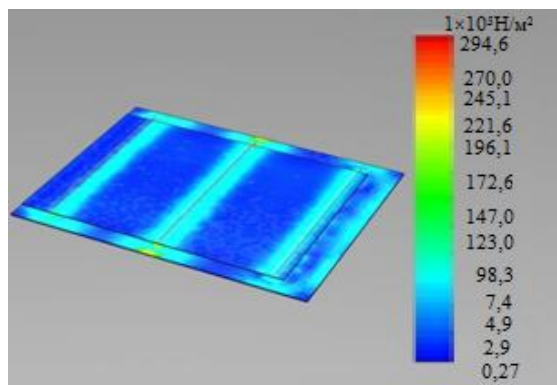


Рисунок 5 – Эпюра напряжений для расчета № 1

Напряжение – 2	VON: Напряжение von Mises в Шаге № 13 (1 секунды)	0 Н/м ² Узел: 19954	3,66314e + 0,07 Н/м ² Узел: 4401
----------------	---	-----------------------------------	--

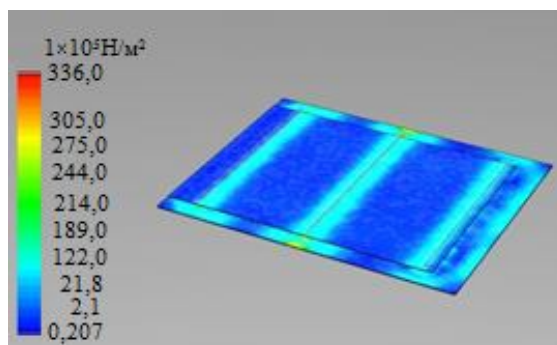


Рисунок 6 – Эпюра напряжений для расчета № 2

Напряжение – 3	VON: Напряжение von Mises в Шаге № 13 (1 секунды)	0 Н/м ² Узел: 19954	4,38187e + 0,07 Н/м ² Узел: 4401
----------------	---	-----------------------------------	--

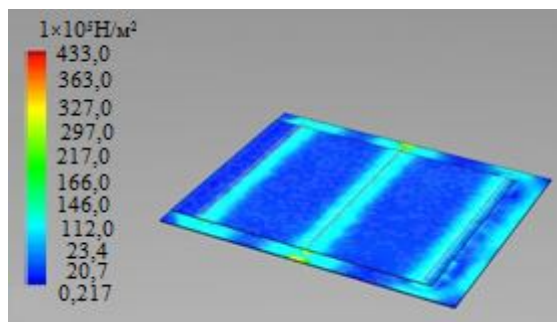


Рисунок 7 – Эпюра напряжений для расчета № 3

Таблица 4 содержит расчеты перемещений по трем опытам численного моделирования, представленным в таблице 2. На рисунках 8–10 таблицы 4 демонстрируются визуализированные эпюры перемещений для трех расчетов.

Таблица 4 – Расчеты перемещений по трем опытам численного моделирования

Имя	Тип	Минимум	Максимум
Перемещение – 1	URES: Результирующее перемещение в Шаге № 13 (1 секунды)	0 мм Узел: 3	5,13784 мм Узел: 7315

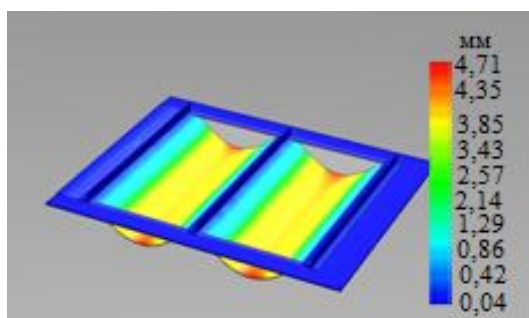


Рисунок 8 – Эпюра перемещений для расчета № 1

Перемещение – 2	URES: Результирующее перемещение в Шаге № 13 (1 секунды)	0 мм Узел: 3	5,57066 мм Узел: 7315
-----------------	--	-----------------	--------------------------

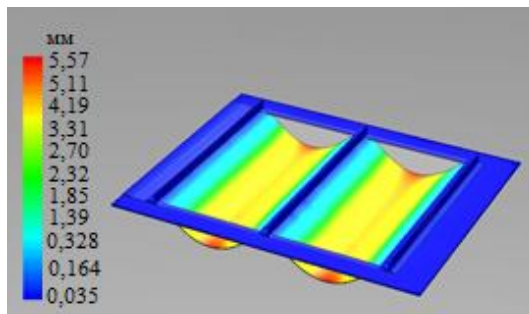


Рисунок 9 – Эпюра перемещений для расчета № 2

Перемещение – 3	URES: Результирующее перемещение в Шаге № 13 (1 секунды)	0 мм Узел: 3	5,9479 мм Узел: 7315
-----------------	--	-----------------	-------------------------

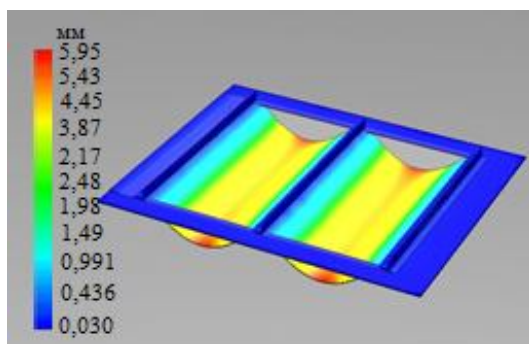


Рисунок 10 – Эпюра перемещений для расчета № 3

По данным эпюрам можно определить перемещения практически в любой точке гибкого рабочего элемента. Также можно констатировать то, что красные участки расположены в местах максимального перемещения, в которых вода наиболее сильно прогибает ленту под действием гидравлического давления. В местах армирования перемещения минимальны, что говорит о его работоспособности и целесообразности.

Полученные результаты наряду с вышеотмеченным позволяют выявить связь напряжений в гибком рабочем органе и перемещений от нагрузки. Данная зависимость представлена на рисунке 11.

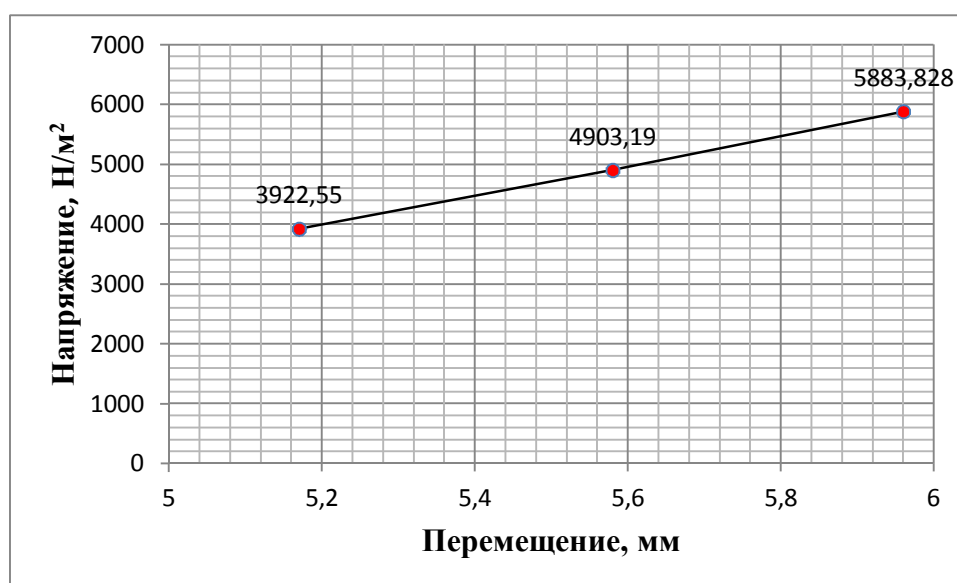


Рисунок 11 – Изменение напряжений и перемещений от нагрузок

Выводы. Анализ результатов исследований позволяет констатировать, что зависимость напряжений и перемещений от нагрузок линейная, при этом возникающие напряжения не превышают допустимые для испытуемого материала, как показано в таблице 1.

Представленное армирование в виде профиля (уголок $20 \times 20 \times 3$) является эффективным, так как его жесткость препятствует прогибу в местах его установки, при этом жесткости уголка вполне достаточно, и сам он как конструктивный элемент не подвержен деформациям. По полученным результатам можно сделать вывод, что необходимо увеличение площади

армирования ленточного регулятора, так как перемещения ленты под действием нагрузки очень значительные. Возможно также повышение жесткости самого гибкого органа, однако это может привести к его неработоспособности из-за особенности действия данного типа регулятора расхода воды.

Таким образом, математическое моделирование работы элемента гидравлического регулятора с гибким рабочим органом, выполненное с использованием программного комплекса SolidWorks в модуле Simulation, однозначно указывает на возможность реализации необходимых и достаточных гидравлических исследований и получения всех требуемых для проектирования данных.

Список использованных источников

1 Водопользование на рисовых гидромелиоративных системах Нижней Кубани: монография / Ю. А. Свистунов, А. Ю. Галкин, А. Ю. Свистунов, С. Н. Якуба. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 295 с.

2 Дегтярев, Г. В. Обоснование мембранного чувствительного элемента для ленточных регуляторов расхода воды / Г. В. Дегтярев, Н. В. Коженко, О. Г. Дегтярева // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар, 2013. – Вып. 5(44). – С. 256–262.

3 Коженко, Н. В. Исследование расходных характеристик задатчика ленточного регулятора расхода для рисовых чеков / Н. В. Коженко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар, 2014. – Вып. № 3(48). – С. 158–163.

4 Пат. 2519508 Российская Федерация, МПК G05D7/01. Регулятор расхода воды / Дегтярев В. Г., Дегтярев Г. В.; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет (RU). – № 2012149515; заявл. 20.11.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. – 7 с.

5 Метревели, В. Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями / В. Н. Метревели. – М.: Высш. шк., 2008. – 192 с.

6 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

7 Дегтярев, В. Г. Экспериментальные исследования и математическое 3D моделирование ленточного регулятора расхода воды / В. Г. Дегтярев, О. Г. Дегтярева // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар, 2015. – Вып. 6(57). – С. 175–182.

8 Проблемы и перспективы использования водных ресурсов в агропромышленном комплексе России: монография / под ред. В. Н. Щедрина. – М.: ЦНТИ «Мелиоводинформ», 2009. – 342 с.

9 Васильев, С. М. Регулирование управленческих процессов в структурированных проблемных ситуациях АПК / С. М. Васильев, Ю. Е. Домашенко // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. – 2016. – № 4. – С. 12–13.

10 Щедрин, В. Н. Теория и практика альтернативных видов орошения черноземов юга Европейской территории России: монография / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев. – Новочеркасск: Лик, 2011. – 435 с.

11 Духовный, В. А. Водохозяйственный комплекс в зоне орошения. Формирование, развитие / В. А. Духовный. – М.: Колос, 1982. – 152 с.

References

1 Svistunov Yu.A., Galkin A.Yu., Svistunov A.Yu., Yakuba S.N., 2014. *Vodopolzovanie na risovykh gidromeliorativnykh sistemakh Nizhney Kubani: monografiya* [Water use in paddy irrigation systems of the Lower Kuban: monograph]. Krasnodar: KubGAU Publ., 295 p. (In Russian).

2 Degtyarev G.V., Kozhenko N.V., Degtyareva O.G., 2013. *Obosnovanie membrannogo chustvitelnogo elementa dlya lentochnykh regulyatorov raskhoda vody* [Justification of the membrane sensor for band water flow regulators]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceed. of Kuban State Agrarian University]. Krasnodar, vol. 5(44), pp. 256-262. (In Russian).

3 Kozhenko N.V., 2014. *Issledovanie raskhodnykh kharakteristik zadatchika lentochnogo regulyatora raskhoda, dlya risovykh chekov* [Research of flow characteristics of band water flow regulator controller for rice paddies]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceed. of Kuban State Agrarian University]. Krasnodar, vol. 3(48), pp. 158-163. (In Russian).

4 Degtyarev V.G., Degtyarev G.V., 2012. *Regulyator raskhoda vody* [Water Flow Regulator]. Patent RF, no. 2012149515. (In Russian).

5 Metreveli V.N., 2008. *Sbornik zadach po kursu gidravliki s resheniyami* [Problem book in course of hydraulics with solutions]. Moscow, Higher School Publ., 192 p. (In Russian).

6 Loytsyanskiy L.G., 2003. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics]. 7th ed. Moscow, Drofa Publ., 840 p. (In Russian).

7 Degtyarev V.G., Degtyareva O.G., 2015. *Ekspperimentalnye issledovaniya i matematicheskoe 3D modelirovanie lentochnogo regulyatora vody* [Experimental studies and mathematical 3D simulation of belt water-flow regulator]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceed. of Kuban State Agrarian University]. Krasnodar, vol. 6(57), pp. 175-182. (In Russian).

8 Shchedrin V.N., 2009. *Problemy i perspektivy ispolzovaniya vodnykh resursov v agropromyshlennom komplekse Rossii: monografiya* [Problems and prospects of water resources use in agro-industrial complex of Russia: monograph]. Moscow, Center of Scientific and Technical Information “Meliovodinform” Publ., 342 p. (In Russian).

9 Vasiliev S.M., Domashenko Yu.Ye., 2016. *Regulirovanie upravlencheskikh protsessov v strukturirovannykh problemnykh situatsiyakh APK* [Regulating managerial processes in structured problematic situations of agro-industrial complexes]. *Vestnik Rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of Russian Agricultural Sciences], no. 4, pp. 12-13. (In Russian).

10 Shchedrin V.N., Vasiliev S.M., 2011. *Teoriya i praktika alternativnykh vidov orosheniya chernozemov yuga evropeyskoy territorii Rossii: monografiya* [Theory and practice of alternative types of irrigation on chernozems in the south of European Russia: monograph]. Novocherkassk: Lick Publ., 435 p. (In Russian).

11 Dukhovnyy V.A., 1982. *Vodokhozyaystvennyy kompleks v zone orosheniya. Formirovanie, razvitie* [Water complex in the irrigation zone. Formation, development]. Moscow, Kolos Publ., 152 p. (In Russian).

Васильев Сергей Михайлович

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: заместитель директора по науке

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Россий-

ский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Vasilyev Sergey Mikhailovich

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Deputy Director of Science

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru